Ferdowsi Civil Engineering, 38, 3, 2025. (97-114)

Ferdowsi University of Mashhad

Ferdowsi Civil Engineering

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir

Iranian Concrete Institute

Pavement Engineering Association of Iran

Laboratory Assessment of the Equivalent Bearing Capacity of Clay Bed Improved with Stone Columns

Research Article

Karim Bahari Amineh[1], Seyyed Mohammad Ali Sadreddini[2], Mohammad Hadi Alizadeh Elizei[3]

DOI: 10.22067/jfcei.2025.92285.1346

1- Introduction

Over the past few decades, construction on loose and problematic soils has posed significant challenges for geotechnical engineers. Among the methods to improve these soils, stone columns are notable, involving the replacement of weak soil portions with granular columns. This research investigates the enhancement of loose clay beds of classes CL and CH using sand columns.

Unreinforced soil samples and those improved with a group of seven stone columns (30 mm diameter, arranged in a triangular pattern) were tested using a large-scale direct shear apparatus. Equivalent shear strength parameters were determined, and bearing capacity values were calculated. The shear tests employed the Fast method.

The effects of variables such as the type of surrounding soil, the number of layers in stone column construction, and the orientation of the limited stone columns (apex/base in triangular arrangement) on shear strength parameters and bearing capacity were evaluated. Results indicated that improving clay soils with stone columns significantly increased the bearing capacity of loose soils. The experimental findings showed that the execution method of stone columns greatly influences their load-bearing capacity. Moreover, improving CL clay soil with stone columns enhanced the bearing capacity more effectively than CH clay soil, indicating higher efficiency of this method in stiffer clay soils.

2- Materials and Methods

The clay subsoil consisted of two types as shown in Figure 1 of soft clay (USCS CL and CH) and a sandy soil for columns. The soil was prepared at optimum moisture and compacted in a 304×304×151 mm shear box. Table 1 lists the properties of the materials. Seven sand columns (30 mm diameter each) were installed in a triangular pattern in the clay matrix. Column construction varied from 1 to 3 lift layers to control uniformity of compaction.

3- Results and Discussion

Soft, problematic clays pose significant challenges for construction due to low strength and high compressibility. One effective improvement method is the employ stone columns, which replace weak clay with compacted granular columns. Stone columns increase lateral confinement, bearing capacity, and accelerate consolidation of saturated clays. This study examines how groups of stone columns affect the undrained bearing capacity of soft clay beds (USCS CL and CH). Large-scale direct shear tests were conducted on unreinforced clay samples and samples improved with triangular groups of seven stone columns. The tests evaluated equivalent shear strength parameters and bearing capacity.

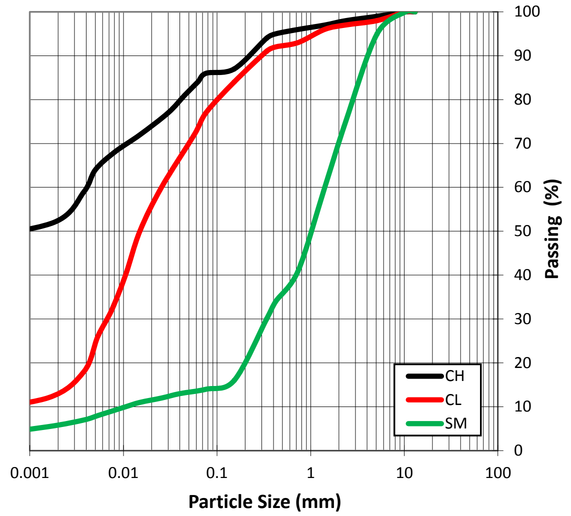


Figure 1: Particle Size Distribution Graph of soils in the study

* Manuscript received 2025 February 22, Revised 2025 March 11, Accepted 2025 May 31.

[1] Corresponding Author, Ph.D. Student, Dept. of Civil Engineering, Islamic Azad University, Roudehen Branch, Iran.
Email: karimbahari.kb@gmail.com

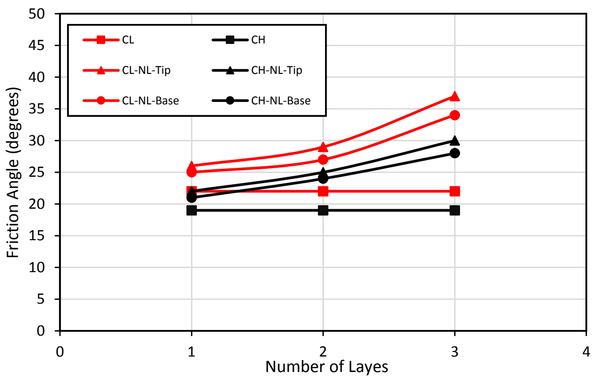
[2] Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Islamic Azad University, Eslamshahr Branch, Iran.

[3] Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Islamic Azad University, Roudehen Branch, Iran.

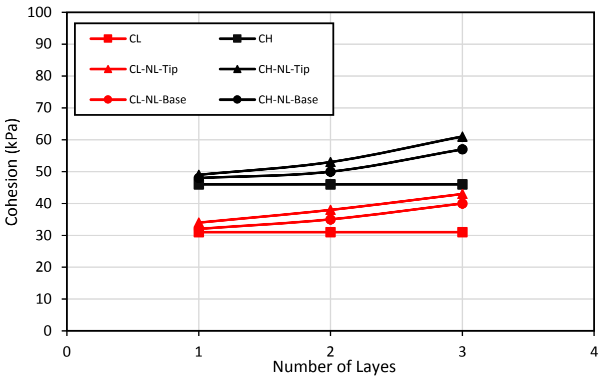
Table 1: Properties of materials

Classification*	ω_{opt}	$\gamma_{d_{max}}$ gr/cm^3	Gs	ω	PI	PL	LL	Materials
CH	19.42	1.571	2.78	16.49	27	24	51	Clay#1
CL	15.56	1.632	2.72	12.51	12	19	31	Clay#2
SM	11.62	1.81	2.66	9.54	---	NPL	---	Sand

* according to Unified soil classification system



(a)



(b)

Figure 2: Variation of a) Internal Friction and b) Equivalent cohesion of reinforced and unrein forced bed using stone column

The large scale direct shear tests showed that stone columns significantly increased peak shear strength of the clay. Regardless of normal stress or number of column layers, all improved samples achieved higher peak shear stress than the corresponding untreated clay as shown in Figure 2 and 3. Increasing the number of column lifts produced higher shear strength due to better lateral confinement. Orientation also had a notable effect: loading from the triangular apex produced higher shear strength than loading from the base.

Equivalent undrained shear parameters (cohesion c′ and friction angle φ′) were computed from the shear tests as shown in Figure 2. Both parameters increased in the column-improved samples relative to the native clay, especially in CL soil. The bearing capacity calculated using these parameters showed improvements of up to 571% in CL soil and 245% in CH soil (Figure 3).

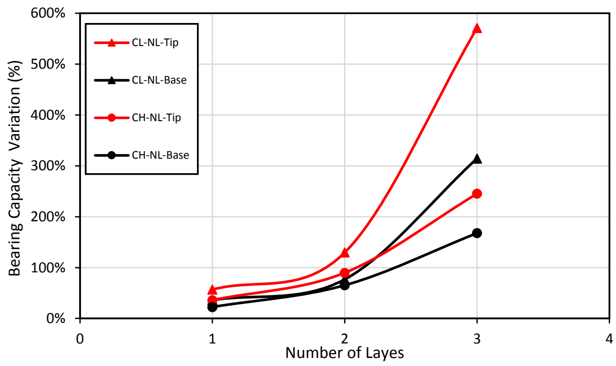


Figure 3: Variation of calculated bearing capacity based on internal friction and cohesion derived from direct shear tests

4- Conclusions

Group arrangements of stone columns can dramatically enhance the undrained strength and bearing capacity of soft clays. The improvement was much greater for CL clay than CH clay due to its higher stiffness and confining effect. Uniform construction with multiple layers resulted in better compaction and higher strength. These results confirm the effectiveness of properly-installed stone column groups for soft clay improvement.

مهندسی عمران فردوسی، ۳۸، ۳، ۱۴۰۴. (۱۱۴-۹۷)

مهندسی عمران فردوسی

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/

انجمن مهندسی روسازی ایران

انجمن بتن ایران

مطالعه آزمایشگاهی ظرفیت باربری معادل بستر رسی به‌سازی شده با ستون سنگی *

مقاله پژوهشی

کریم بهاری امینه [۱]   سید محمد علی صدرالدینی [۲]   محمد هادی علیزاده الیزیی [۳]

DOI: 10.22067/jfcei.2025.92285.1346

چکیده در چند دهه اخیر، ساخت‌وساز بر روی خاک‌های سست و مسئله‌دار، چالش‌ها و مشکلات زیادی را پیش‌روی مهندسان ژئوتکنیک قرار داده است. در این میان، روش‌های متعددی برای به‌سازی این خاک‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. از جمله این روش‌ها، استفاده از ستون سنگی است که با حذف بخشی از خاک ضعیف و جایگزینی آن با ستون‌های خاک دانه‌ای صورت می‌گیرد. در این تحقیق، به‌سازی بستر رسی سست از دو طبقه CL و CH، با ستون‌های سنگی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، نمونه‌های به‌سازی نشده و به‌سازی شده با گروه ستون سنگی، شامل ۷ ستون با قطر ۳۰ میلی‌متر و چیدمان مثلثی، در دستگاه برش مستقیم بزرگ‌مقیاس مورد آزمایش قرار گرفته و پارامترهای مقاومت برشی معادل و مقادیر ظرفیت باربری تعیین شده‌اند. آزمایش برش با استفاده از روش سریع انجام شده است. همچنین تأثیر متغیرهایی چون نوع خاک پیرامونی، تعداد لایه‌های ساخت ستون سنگی و راستای چینش ستون‌های سنگی محدود با چیدمان مثلثی (رأس/ قاعده) بر پارامترهای مقاومت برشی و ظرفیت باربری مورد ارزیابی قرار گرفته است. بر اساس نتایج حاصل، به‌سازی خاک رسی با استفاده از روش گروه ستون سنگی موجب افزایش قابل توجه ظرفیت باربری خاک‌های سست شده است. نتایج آزمایش انجام شده نشان داد کیفیت ستون سنگی اهمیت زیادی در توان باربری آن دارد. علاوه بر این به‌سازی خاک رسی CL نسبت به به‌سازی خاک CH به روش ستون سنگی می‌تواند توان باربری بستر را بیشتر افزایش دهد که بیانگر کارایی بیشتر این روش به‌سازی در خاک‌های رسی سخت‌تر است.

واژه‌های کلیدی بستر رسی، ستون سنگی، برش مستقیم بزرگ‌مقیاس، مقاومت برشی، ظرفیت باربری.

Laboratory Investigation of the Equivalent Bearing Capacity of Clay Bed Improved with Stone Columns

Karim Bahari Amineh   Seyyed Mohammad Ali Sadreddini   Mohammad Hadi Alizadeh Elizei

Abstract *Over the past few decades, construction on loose and problematic soils has posed significant challenges for geotechnical engineers. Among the methods to improve these soils, stone columns are notable, involving the replacement of weak soil portions with granular columns. This research investigates the enhancement of loose clay beds of classes CL and CH using sand columns. Unreinforced soil samples and those improved with a group of seven stone columns (30 mm diameter, arranged in a triangular pattern) were tested using a large-scale direct shear apparatus. Equivalent shear strength parameters were determined, and bearing capacity values were calculated. The shear tests employed the Fast method. The effects of variables such as the type of surrounding soil, the number of layers in stone column construction, and the orientation of the limited stone columns (apex/base in triangular arrangement) on shear strength parameters and bearing capacity were evaluated. Results indicated that improving clay soils with stone columns significantly increased the bearing capacity of loose soils. The experimental findings showed that the execution method of stone columns greatly influences their load-bearing capacity. Moreover, improving CL clay soil with stone columns enhanced the bearing capacity more effectively than CH clay soil, indicating higher efficiency of this method in stiffer clay soils.*

Key words Clayey bed, Sand column, Large-scale direct shear Test, Shear strength parameters, Bearing capacity.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۳/۱۲/۴ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۳/۱۰ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رودهن.

(۲) نویسندهٔ مسئول، استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر.

(۳) استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رودهن.

Email: ali.sadreddini@iau.ac.ir

مقدمه

برخی از خاک‌ها، به علت مشخصات فنی نامطلوب و یا دارا بودن مقادیر قابل توجهی رس یا لای، برای عملیات عمرانی نامرغوب محسوب می‌شوند. این گونه خاک‌ها به دلیل حساسیت و ناپایداری در برابر رطوبت، مقاومت کم و تراکم‌پذیری، مشکلات فراوانی را از نظر فنی و اقتصادی ایجاد می‌کنند. چنانچه مسیر یک راه از مناطقی که دارای خاک‌های نامرغوب باشد، عبور کند، طرح و اجرای زیرسازی و روسازی، مستلزم استفاده از لایه‌هایی با مصالح متفاوت و ضخیم خواهد بود. این امر باعث مصرف مقادیر قابل توجه مصالح، افزایش هزینه‌های عملیاتی و طولانی شدن زمان اجرای پروژه می‌شود. در این موارد اغلب اقدام به تغییر مسیر راه یا تعویض خاک می‌گردد. هرگاه به عللی، امکان تغییر مسیر و یا تعویض خاک نباشد و یا اینکه هزینه تعویض خاک مقرون به صرفه نباشد، باید روش اصلاح و به‌سازی خاک مورد بررسی قرار گیرد تا چنانچه از نظر اقتصادی و فنی قابل توجیه باشد، به انجام آن مبادرت گردد [1,35]. در این میان، اجرای ستون‌های سنگی، به عنوان روشی مؤثر، اقتصادی و سازگار با محیط زیست، دارای قابلیت به‌سازی زمین‌های متشکل از خاک‌های چسبنده و غیرچسبنده سست می‌باشد [2,38]. این ستون‌ها، به علت کارایی مناسب یکی از متداول‌ترین روش‌های اصلاح خاک هستند. استفاده از این ستون‌ها، موجب افزایش ظرفیت باربری خاک‌های نرم و سست شده و نشست آن‌ها را در اثر بارهای وارده کاهش می‌دهند. در خاک‌های رسی اشباع، این ستون‌ها به عنوان زهکش عمل کرده و باعث کاهش زمان تحکیم می‌شوند [3] و [40-37]. برخی از روش‌های اصلی اجرایی این ستون‌ها که در شرایط مختلف سایت‌ها قابل اعمال می‌باشند، شامل روش جایگزینی ـ ارتعاشی (Vibro-Replacement) یا روش تر، روش جابه‌جایی ـ ارتعاشی (Vibro-Displacement) یا روش خشک، روش ستون سنگی کوبشی (Rammed stone column)، شمع‌های متراکم ماسه‌ای (Compacted sandy pile)، روش چرخشی ـ جابه‌جایی (Rotary Displacement or Rotocolumn Method) و روش ستون سنگی صلب (Rigid Stone Column) می‌باشد.

ستون‌های سنگی، اولین بار توسط مورآو (Moreau) و همکاران در کشور فرانسه و به منظور تقویت پی با اهداف نظامی به کار گرفته شدند که این اقدام، کاهش نشست و افزایش قابل توجه ظرفیت باربری را به دنبال داشت. سپس کاربرد این روش در کشورهای صنعتی گسترش یافت و فرایندهای اجرای آن بهبود بخشیده شد. قبل از سال ۱۷۹۱، اغلب تحقیقات در زمینه ستون سنگی، محدود به کارهای تجربی بود. سال ۱۷۹۱، اولین بررسی آزمایشگاهی بر روی ستون سنگی انجام گرفت که دلیل شکست ستون سنگی، انبساط جانبی در قسمت بالای ستون گزارش شد و بر این اساس، مفهوم سلول واحد، برای پیش‌بینی ظرفیت باربری ستون‌های سنگی ارائه گردید [4]. در ایران، استفاده از ستون سنگی برای نخستین بار با استفاده از روش کوبیدنی اجرا شد و از سال ۱۳۸۳، تکنیک‌های ارتعاشی ساخت ستون‌های سنگی در ایران مورد استفاده قرار گرفت [2].

ظرفیت باربری ستون سنگی، به عواملی نسبت داده می‌شود که عبارتند از ویژگی‌های اصطکاکی ستون، چسبندگی و ویژگی‌های اصطکاکی خاک‌های اطراف ستون، انعطاف‌پذیری یا صلبیت فونداسیون برای انتقال تنش‌ها به خاک به‌سازی شده و همچنین، مقدار فشار جانبی توسعه یافته در توده خاک اطراف و اعمال آن به کناره‌های ستون سنگی، به علت اندرکنش بین عناصر مختلف در سیستم. ستون سنگی، ظرفیت محوری خود را از فشار منفعل توسعه یافته در خاک، ناشی از اثر شکم‌دادگی ستون و افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل جانبی تحت سربار به دست می‌آورد [5]. شکست ستون‌های سنگی، به صورت انبساط جانبی، شکست برش (ستون، پانچ و کلی)، خمش و کمانش مشاهده شده است [6]. عملکرد خاک مسلح شده با ستون سنگی نیز، به پارامترهای مختلفی بستگی دارد. به منظور درک و پیش‌بینی رفتار ستون‌های سنگی، مطالعات بسیاری بر اساس مدل‌سازی فیزیکی، تجزیه و تحلیل ریاضی و آزمون‌های آزمایشگاهی انجام شده‌اند که در ادامه به برخی از این مطالعات اشاره می‌گردد.

ازاگناندی و کالومبا (Aza-Gnandji & Kalumba) [7]، با بررسی عددی و انجام آزمایش به این نتیجه رسیدند که هنگام تغییر قطر ستون در خاک پایه به میزان ۱/۵، ۲ و ۳ برابر قطر اولیه ستون، ظرفیت باربری، تقریبا به میزان ۲، ۴ و ۱۰ برابر مقاومت اولیه افزایش می‌یابد. فولادی [8]، با بررسی تأثیر ستون سنگی بر ظرفیت باربری خاک دریافت که در مدل‌های با مقیاس خیلی کوچک، تشابه لازم بین نمونه‌های آزمایشگاهی و واقعی وجود ندارد و نمی‌توان از نتایج مدل‌های خیلی کوچک استفاده کرد.

پژوهش انجام شده توسط مختاری [9] نشان داده است که افزایش قطر، ارتفاع، تعداد، سختی و زاویه اصطکاک داخلی ستون‌ها، افزایش درصد ناحیه اصلاح شده و کاهش عرض پی، تأثیر افزایشی بر ظرفیت باربری خاک دارند. مرادی (۲۰۱۶) [10] با بررسی تأثیر افزایش قطر و تغییر چیدمان ستون‌های سنگی، نوع خاک پیرامونی ستون سنگی و درصد رطوبت خاک پیرامونی بر ظرفیت باربری خاک رس، بیشترین افزایش ظرفیت باربری را برای نمونه‌های متشکل از خاک رس و ستون‌های سنگی دارای قطر ۷ سانتی‌متر، با چیدمان مثلثی و رطوبت خاک پیرامونی معادل دو درصد کمتر از رطوبت بهینه گزارش کرده که نسبت به ظرفیت باربری خاک‌های CL و CH پیرامونی شاهد، به ترتیب، افزایشی به میزان ۵/۵ برابر و ۴/۳ برابر حاصل شده است. کردگار [11] در مطالعه خود برای مدل کردن اثر استفاده از ستون سنگی بر ظرفیت باربری خاک‌های رسی، از برنامه اجزای محدود PLAXIS استفاده کرده است. بر اساس نتایج، تأثیر طول ستون سنگی و سختی پوشش آن‌ها بر ظرفیت باربری، نسبت به سایر عوامل، بیشتر قابل توجه است و باید در تحلیل و طراحی جامع سیستم خاک ـ سازه در نظر گرفته شود.

در پژوهش انجام شده توسط حنا، خلیفه و عبدالرحمان (Hanna; Khalifa & Abdel Rahman) [12] برای بررسی عملکرد خاک رس مسلح شده با ستون‌های سنگی منفرد و گروهی، یک روش آزمایشگاهی جدید با لحاظ نمودن اثر انرژی تراکم مورد استفاده در طول فرایند نصب ستون سنگی، همچنین، اثر فاصله بین ستون‌های سنگی بر مقاومت برشی خاک مسلح شده ارائه شده است. اصلانی، نظری افشار و گنجیان [13] یک مطالعه آزمایشگاهی برای بررسی مقاومت برشی بستر ماسه مسلح شده با ستون سنگی، با انجام آزمایش برش مستقیم بزرگ‌مقیاس و تغییر چیدمان ستون‌های سنگی انجام داده‌اند. با توجه به نتایج حاصل، بیشترین افزایش در مقادیر مقاومت برشی و سختی، برای چیدمان مربعی ستون‌های سنگی و حداقل افزایش، برای ستون‌های سنگی منفرد مشاهده شده است.

نظری افشار و همکاران [17] در تحقیقات خود در خصوص بررسی مقاومت برشی معادل خاک‌های چسبنده به‌سازی شده با ستون‌های سنگی، با استفاده از دستگاه سه محوری و نمونه‌های آزمایشگاهی با قطر ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌متر، مطالعاتی انجام دادند. ایشان تأثیر پارامترهایی همچون فشار دورگیر (۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال)، نسبت ناحیه اصلاح شده (٪۱۴ و ٪۲۶) و قطر ستون‌های سنگی (۳۷٫۵ و ۵۱ میلی‌متر) را بر رفتار خاک نرم تحلیل کردند. نتایج نشان داد افزودن ستون‌های سنگی منجر به افزایش قابل توجه مقاومت برشی زهکشی نشده و سختی نمونه ها می‌شود، به طوری با افزایش قطر ستون و فشار دورگیر، تنش انحرافی نهایی نمونه‌ها روند صعودی داشت. همچنین مشخص شد اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و روابط تحلیلی موجود (مانند روش همگن‌سازی خطی) در خاک‌های با مقاومت برشی پایین بیشتر است، که بیانگر نیاز به اصلاح این روابط با در نظر گرفتن اثرات تمرکز تنش در خاک‌های بسیار نرم است.

حمزه، محمد و بن‌یوسف (Hamzh; Mohamad & Bin Yusof) [14] با مقایسه بین شکل‌های یکنواخت و غیریکنواخت ستون برای تعیین طرح بهینه ستون، دو تحلیل اجزای محدود دوبعدی با استفاده از نرم‌افزار Plaxis انجام داده‌اند. به طور کلی، روش مورد استفاده در این پژوهش (قطر بزرگ‌تر در بالا و قطر کوچک‌تر در پایین ستون)، استفاده از حجم کمتر مصالح سنگی و در نتیجه، هزینه کمتر و دستیابی به سطحی از ظرفیت باربری مشابه ستون استاندارد را امکان‌پذیر می‌سازد. در پژوهش صورت گرفته توسط الوایلی، فتاح و القیاسی (Al-Waily; Fattah & Al-Qaisi) [15] گزارش شده است که نسبت تمرکز تنش (نسبت تنش اعمال شده بر روی ستون‌های سنگی، به تنش اعمال شده بر روی خاک مجاور ستون) و ظرفیت باربری خاک به‌سازی شده با ستون سنگی (مقدار نشست تحت تنش اعمال شده)، با افزایش مقاومت برشی زهکشی نشده (C_U)، تعداد ستون‌های سنگی (N_S) و نسبت L/D (قطر/ طول) افزایش می‌یابد. نتایج پژوهش هاتف، نبی‌پور و صدر [16]، برای بررسی اثرات طول محصورشدگی (نصف طول ستون و طول کامل ستون) و نوع مصالح سنگی بر ظرفیت باربری یک ستون سنگی منفرد مدفون در هر دو بستر رسی و ماسه‌ای، نشان دهنده بهبود مشخص ظرفیت باربری با محصور شدن نصف طول ستون بوده‌اند. همچنین، برای مصالح با اندازه کوچک‌تر، محصور کردن ستون‌های سنگی، بهبود بیشتری نسبت به مصالح درشت‌تر ایجاد می‌کند. از سوی دیگر، با توجه به نتایج آزمایش‌ها، محصور کردن ستون‌ها در بستر رسی، تأثیرگذارتر از ماسه است.

غفار پور و همکاران [34] به بررسی تأثیر عواملی همچون شکل و هندسه ستون‌های سنگی، آرایش ستون‌های سنگی و

مشخصات فنی مصالح استفاده شده در ساخت ستون‌های سنگی با استفاده از روش‌های عددی اجزای محدود بر روی بیش از ۱۵۰ مدل پرداخته‌اند. مطالعه آن‌ها نشان داد که استفاده از ستون‌های سنگی تأثیر بسیار زیاد و قابل توجهی بر افزایش ظرفیت باربری خاک‌های سست دارد و نیز می‌تواند باعث کاهش نشست شود.

در پژوهش انجام شده توسط حداد و شاهوردی [18] عملکرد ستون سنگی شناور ساخته شده با سنگدانه‌های بازیافتی و سنگدانه طبیعی، با انجام آزمایش بارگذاری محوری کوچک‌مقیاس مورد مقایسه قرار گرفته است. با توجه به یافته‌ها، ظرفیت باربری بستر رس مسلح به ستون شناور پر شده با خرده آجر یا خرده بتن، تقریبا ۵ برابر ظرفیت باربری بستر رسی بدون سنگ بوده است. همچنین، ستون‌های سنگی شناور ساخته شده از یک نوع سنگدانه، عملکرد به مراتب بهتری نسبت به ستون سنگی ساخته شده از ترکیب چند نوع مصالح بازیافتی با یکدیگر یا ترکیب مصالح بازیافتی با سنگدانه طبیعی داشته‌اند.

مهران نیا و همکاران [40] با استفاده از مدل‌سازی آزمایشگاهی تأثیر مشخصات هندسی ستون‌های سنگی بر ظرفیت باربری خاک‌های سست را مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعه بزرگ مقیاس آن‌ها نشان داد با استفاده از ستون‌های سنگی دارای غلاف ژئوتکستایل ظرفیت باربری خاک سست و نسبت تمرکز تنش به طرز قابل توجهی افزایش می‌یابد.

در مطالعه صورت گرفته توسط ژو و همکاران (Xu et al.) [19] اثرات ابعاد، طول و پارامترهای اصلی مرتبط با ستون سنگی بر رفتار تنش ـ کرنش ستون‌های سنگی محصور شده با ژئوگرید و ستون‌های غیرمسلح (محصور نشده) مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آزمایشگاهی، با نتایج حاصل از نرم‌افزار Plaxis مقایسه شده‌اند. نتایج حاصل نشان داده‌اند که وجود ستون‌های سنگی، موجب افزایش ظرفیت باربری خاک نرم، حداقل به میزان ۲ برابر شده و حتی با وجود کوتاه بودن طول، نشست‌های تفاضلی و کل را کاهش داده‌اند.

ساکسنا و روی (Saxena & Roy) [20] گزارش کرده‌اند که ظرفیت باربری ستون سنگی، عمدتا به زاویه اصطکاک داخلی مصالح ستون، قطر ستون سنگی، طول ستون سنگی، فاصله بین ستون‌های سنگی و چسبندگی زهکشی نشده خاک اطراف ستون سنگی بستگی دارد. در این مطالعه، فاصله بیش از 2D برای ستون‌ها (D: قطر ستون) پیشنهاد شده است. از سوی دیگر، ظرفیت باربری ستون سنگی، با افزایش زاویه اصطکاک داخلی مصالح ستون و قطر ستون سنگی افزایش یافته است. کاظم‌زاده، زاد و یزدی [21] پژوهشی با هدف بررسی و کنترل میزان نشست و پایداری بستر رس نرم و خاکریز راه‌آهن تحت عبور قطار پرسرعت انجام داده‌اند. بر اساس نتایج، کاهش نشست کل و افزایش ظرفیت باربری ستون، وابسته به ارتفاع ستون سنگی بوده و قطر ستون سنگی بر منطقه تحت تأثیر ستون سنگی تأثیرگذار است. همچنین افزایش سختی ژئوگرید، موجب کاهش نشست کل و نشست نامتقارن و کاهش طول محصورشدگی ستون سنگی توسط ژئوگرید، منجر به افزایش نشست کل و نشست نامتقارن شده است. در مطالعه بزاززادگان، گنجیان و نظری افشار [22] اثر استفاده از ستون سنگی واقع بر بستر ماسه‌ای اشباع حاوی لنز ضعیف با استفاده از نرم‌افزار آباکوس مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل نشان داده‌اند که در شرایط وجود لنز ضعیف، تغییر طول ستون سنگی غیرمسلح، تأثیر چندانی بر وقوع مود گسیختگی شکم‌دادگی و باربری آن نداشته و کاهش عمق قرارگیری لنز ضعیف، اثرات شکم‌دادگی ستون را افزایش می‌دهد.

برخی مطالعات آزمایشگاهی انجام شده شامل ساخت مدل‌های فیزیکی و آزمایش‌های آزمایشگاهی پر هزینه مانند سانتریفیوژ بوده است. امیر افشاری و قنبری [23] با استفاده از مدل‌های سانتریفیوژی ژئوتکنیکی، به بررسی عملکرد پی‌های حلقوی تقویت شده با ستون‌های سنگی بر روی لایه‌های خاک سست پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که به‌کارگیری ستون‌های سنگی با نسبت طول به قطر ۸ و آرایش حلقوی، موجب افزایش ظرفیت باربری به میزان ۲٫۸ برابر و افزایش مقادیر ضریب واکنش زیرسطحی (ks) و مدول یانگ (E) به میزان حدود ۳٫۴ برابر نسبت به حالت بدون تقویت می‌شود. برخی محققان نیز به کاربرد ژئوسنتتیک‌ها در ساخت ستون سنگی پرداخته‌اند. فن و ناصری [24] به بررسی عملکرد ستون‌های سنگی محصور در ژئوتکستایل عمودی (VGESC) و ستون‌های سنگی تقویت شده با پوشش‌های ژئوتکستایل افقی (HGCRSC) در شیب شنی کرمانشاه ایران می‌پردازد. نتایج آزمایشگاهی و تحلیل‌های عددی سه‌بعدی نشان می‌دهد که ستون‌های محصور در ژئوتکستایل موجب افزایش ۶۲ درصدی ظرفیت باربری و تغییر حالت شکست از برشی به خمشی می‌شوندVGESC .

تأثیرات بهتری نسبت به HGCRSC دارد.

یکی از روش‌های به‌سازی بستر دایک‌ها و دستک‌های رسوب‌گیر در سواحل که در برخی نواحی شامل خاک رسی با خصوصیات مکانیکی متنوع می‌باشد روش ستون‌های ماسه‌ای، شنی و سنگی است. این روش امکان کاهش پتانسیل روانگرایی را دارد و حتی در صورت اجرا با الگوی مشخص مقاومت جانبی محدودی را در برابر پدیده گسترش جانبی فراهم می‌کند. با توجه به عرض کم دستک‌های رسوب‌گیر، عمدتا اجرای روش‌های فوق با تعداد کم در مقطع عرضی مورد نیاز است. با نگاهی به پژوهش‌ها و مطالعات صورت گرفته [40-35]، می‌توان دریافت که در گذشته بررسی‌های عددی و آزمایشگاهی برای تعیین ظرفیت باربری بستر سست مسلح شده با ستون‌های سنگی انجام شده است. در این مطالعات، تأثیر عوامل مختلف بر ظرفیت باربری مورد ارزیابی قرار گرفته، اما تأثیر عواملی چون نوع خاک پیرامونی، تعداد لایه‌های ساخت ستون سنگی که بیانگر نحوه اجرا و یکنواختی تراکم در ستون‌ها می‌باشد و یا راستای چینش ستون‌ها نسبت به جهت بارگذاری در خصوص گروه ستون سنگی محدود (تعداد کم ستون‌ها)، چندان مورد توجه قرار نگرفته است. با توجه به اهمیت انرژی تراکم در طول فرایند ساخت ستون سنگی و مرتبط بودن میزان تراکم و یکنواختی تراکم در طول هر ستون با تعداد لایه‌های ساخت ستون سنگی، همچنین اهمیت ویژگی‌های خاک سست پیرامون ستون‌های سنگی بر عملکرد این ستون‌ها، در پژوهش حاضر، خاک رس پیرامونی سست از دو طبقه مختلف با استفاده از ستون‌های سنگی مسلح شده و رفتار نمونه‌های متشکل از خاک پیرامونی و ستون سنگی، با تغییر راستای بارگذاری نسبت به چیدمان مثلثی و تعداد لایه‌های ساخت ستون سنگی، در دستگاه برش مستقیم بزرگ‌مقیاس با هدف بررسی مقاومت برشی معادل و عملکرد این روش به‌سازی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. دستگاه آزمایش برش مستقیم بزرگ‌مقیاس با توجه به امکان اعمال تنش قائم یکنواخت و ایجاد صفحه برش برآورد مقاومت برشی گروه ستون سنگی را در شرایط کنترل شده آزمایشگاهی میسر می‌کند. از انجام آزمایش‌های مذکور، پارامترهای مقاومت برشی معادل که بیانگر عملکرد خاک رس مسلح شده با ستون سنگی است و ظرفیت باربری معادل کل مجموعه ارزیابی و مقایسه می‌گردد.

دستگاه آزمایش

در این مطالعه از دستگاه برش مستقیم بزرگ‌مقیاس، مطابق استاندارد ASTM D3080 [25] به روش سریع، بر روی خاک با رطوبتی معادل رطوبت بهینه استفاده شده است. در روش آزمایش UU، به نمونه اجازه زهکشی داده نمی‌شود و این موضوع، در پروژه‌های عمرانی در مواردی مانند بالادست سازه‌های هیدرولیکی، فشارهای جانبی خاک در سازه‌های نگهبان، سازه‌ها در مناطق زلزله‌خیز و... که سرعت اعمال فشار وارده قابل ملاحظه است، مصداق دارد.

مصالح مورد استفاده

در این تحقیق، دو نوع خاک رس به عنوان خاک پیرامونی ستون‌های سنگی و یک نوع خاک ماسه برای ساخت ستون سنگی مورد استفاده قرار گرفته است. نوع و ابعاد مصالح خاک پیرامونی با توجه به نوع خاک معمول موجود در بنادر و سواحل که نیازمند به‌سازی هستند و نوع و ابعاد مصالح ستون‌ها با توجه به خصوصیات مصالح معمول در ساخت ستون‌های شنی و ماسه‌ای انتخاب گردید. خاک‌های مذکور، تحت آزمایش دانه‌بندی با روش الک (استاندارد ASTM-D422 [26])، آزمایش هیدرومتری مصالح با روش رسوب‌سنجی (استاندارد ASTM-D422)، آزمایش تعیین حدود آتربرگ (استاندارد ASTM-D4318 [27])، آزمایش تعیین درصد رطوبت طبیعی مصالح (استاندارد ASTM--D2216 [26])، آزمایش تعیین چگالی ذرات جامد توده خاک (G_s) (استاندارد ASTM-D854 [29]) و آزمایش تراکم به روش پراکتور استاندارد (استاندارد ASTM-D698 [30]) قرار گرفته‌اند. مشخصات مصالح مورد استفاده در جدول (۱) آزمایش‌ها و استانداردهای ارزیابی در جدول (۲) و نمودار دانه‌بندی آن‌ها در شکل (۱) نمایش داده شده است. مطابق سیستم طبقه‌بندی متحد (استاندارد ASTM-D2487 [31])، خاک‌های مورد استفاده در این تحقیق از طبقه CH (رس با خاصیت خمیری زیاد، همراه با ماسه)، طبقه CL (رس با خاصیت خمیری کم، همراه با ماسه) و خاک ماسه از طبقه SM (ماسه لای‌دار) بوده‌اند. لازم به ذکر است در جدول (۱) LL حد روانی، PL حد خمیری، PI شاخص خمیری، ω درصد رطوبت نمونه‌سازی، G_s چگالی ویژه دانه‌های خاک، γ_{dmax} وزن مخصوص خشک حداکثر، ω_{opt} درصد رطوبت بهینه است.

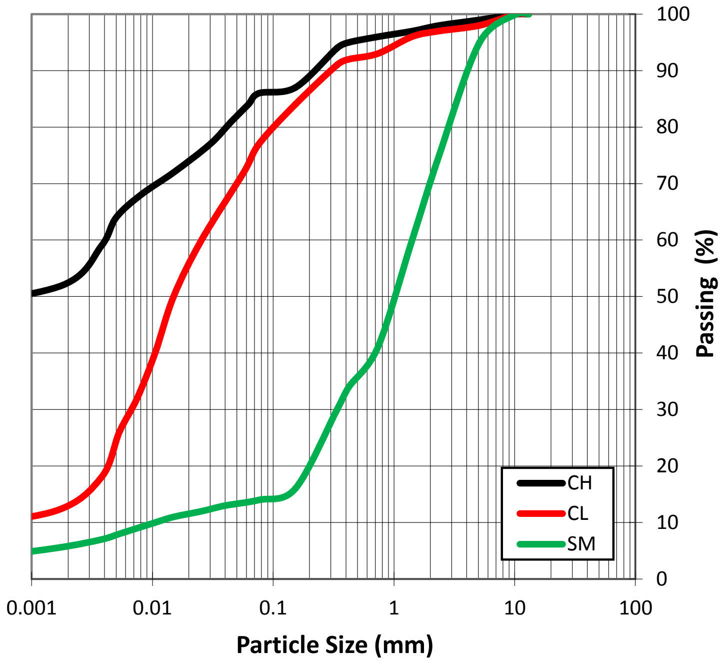
جدول ۱ مشخصات مصالح خاکی مورد استفاده

Classification*	optω	$\gamma_{d_{max}}$ gr/cm3	GS	ω	PI	PL	LL	Materials
CH	19.42	1.571	2.78	16.49	27	24	51	Clay#1
CL	15.56	1.632	2.72	12.51	12	19	31	Clay#2
SM	11.62	1.81	2.66	9.54	---	NPL	---	Sand

* according to Unified soil classification system

جدول ۲ آزمایش انجام شده و استانداردها

Standard Code	Test	#
ASTM-D422	آزمایش دانه‌بندی با روش الک [25]	1
ASTM-D422	آزمایش هیدرومتری مصالح با روش رسوب‌سنجی[25]	2
ASTM-D4318	آزمایش تعیین حدود آتربرگ[27]	3
ASTM- D2216	آزمایش تعیین درصد رطوبت طبیعی مصالح[28]	4
ASTM-D854	آزمایش تعیین چگالی ذرات جامد توده خاک (Gs)[29]	5
ASTM-D698	آزمایش تراکم به روش پراکتور استاندارد[30]	6
ASTM-D3080	آزمایش برش مستقیم خاک[25]	7



شکل ۱ منحنی دانه‌بندی مصالح رسی نوع ۱ و ۲ و مصالح ماسه‌ای

جدول ۳ جدول برنامه آزمایش‌های انجام شده شامل مشخصات نمونه‌ها

Title	Surrounding Soil type	Loading Position	Stone column Preparation Layer
CL-1L-Tip	CL	Tip	1
CL-2L-Tip			2
CL-3L-Tip			3
CL-1L-Base		Base	1
CL-2L- Base			2
CL-3L- Base			3
CH-1L-Tip	CH	Tip	1
CH -2L-Tip			2
CH -3L-Tip			3
CH -1L-Base		Base	1
CH -2L- Base			2
CH -3L- Base			3

*SM Soil Column with 70 mm diameter and Triangle arrangement,
**Surrounding soil has been prepared with optimum moisture content

روش انجام آزمایش

در این تحقیق، ابتدا آزمایش‌های اولیه‌ای، به منظور بررسی اثر پارامترهای متغیر تعریف شده، شامل نوع خاک پیرامونی، تعداد لایه‌های ساخت ستون سنگی و بارگذاری در راستای چینش از رأس یا قاعده در چیدمان مثلثی، بر پارامترهای مقاومت برشی و ظرفیت باربری خاک رس سست به‌سازی شده با ستون سنگی انجام گردید. سپس بر اساس نتایج آن آزمایش‌ها (موضوع این مطالعه) نمونه‌های مکعبی ساخته شد و تحت آزمایش برش مستقیم بزرگ‌مقیاس تحت تنش‌های نرمال ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال قرار گرفت. نمونه‌ها، دارای ابعاد ۳۰۴×۳۰۴ میلی‌متر و ارتفاع ۱۵۱ میلی‌متر، متشکل از خاک رس سست پیرامونی از طبقه CL یا CH و گروه ستون سنگی (۷ ستون با قطر ۳۰ میلی‌متر) بوده‌اند. ستون‌های سنگی در ۱ تا ۳ لایه ساخته شده و تحت بارگذاری در راستای چینش از رأس یا قاعده در چیدمان مثلثی قرار گرفته‌اند.

در این تحقیق، علاوه بر نمونه‌های شاهد، در مجموع، ۱۲ مجموعه نمونه مرکب برای آزمایش با دستگاه برش مستقیم بزرگ‌مقیاس ساخته شد. برنامه آزمایش‌های انجام شده در این مطالعه و مشخصات نمونه‌های مرکب ساخته شده، در جدول (۳) ارائه گردیده است.

در آزمایش انجام شده، فشار وارد بر نمونه‌ها تا مرحله گسیختگی ادامه یافته است. سرعت بارگذاری نمونه‌ها در فاز گسیختگی، به میزان ۱ میلی‌متر بر دقیقه انتخاب گردید و گسیختگی تا کرنش ۲۰ درصد ادامه یافت. دلیل انتخاب تعداد ۷ ستون با قطر ۳۰ میلی‌متر و چیدمان مثلثی برای ستون‌های سنگی مورد آزمایش در دستگاه برش مستقیم در این تحقیق، استفاده از نتیجه حاصل از مطالعه انجام شده توسط مرادی [10] بوده که طبق نتایج آزمایش‌های انجام شده در تحقیق وی، در این مطالعه با توجه به ابعاد جعبه برش، تعداد ۷ ستون با قطر ۷۰ میلی‌متر و با چیدمان مثلثی، به صورت بهینه انتخاب شده است.

نحوه ساخت نمونه‌ها

ابتدا کل جعبه دستگاه آزمایش برش مستقیم بزرگ‌مقیاس با ابعاد ۱۵۱×۳۰۴×۳۰۴ میلی‌متر، با خاک رس پیرامونی مورد استفاده از نوع CL یا CH، در سه لایه حدود ۵۰ میلی‌متری پر شده و با اضافه نمودن رطوبت تا مقدار رطوبت بهینه و رسیدن به وزن

مخصوص خشک حداکثر، خاک متراکم می‌گردد. سپس، شابلون ساخته شده برای استقرار ۷ ستون سنگی با قطر ۳۰ میلی‌متر و چیدمان مثلثی، بر روی جعبه پر شده از خاک رس قرار گرفته و لوله‌های فولادی برنده نازک به عمق ۱۵۱ میلی‌متر، در خاک رس درون جعبه با انرژی کوبشی فرو رانده می‌شوند. پس از کوبیدن تعداد لوله‌های مورد نیاز در چیدمان مثلثی ستون‌های سنگی، با استفاده از اوگر (Auger)، تمام مصالح داخل لوله‌ها تخلیه می‌شوند. هم-اکنون، شرایط برای ساخت و استقرار ستون‌های سنگی آماده است. مصالح ستون سنگی (ماسه از طبقه SM)، با رطوبت معادل رطوبت بهینه، در تعداد لایه‌های مختلف (۱، ۲ و۳) داخل لوله‌ها قرار می‌گیرد، به طوری که پس از ریختن هر لایه، مصالح با چکش مخصوص تا رسیدن به وزن مخصوص خشک حداکثر کوبیده می‌شود و با هر بار کوبیدن، لوله جدار تا تراز مشخصی بالا آورده می‌شود و تا زمانی که کل لوله خارج شود، این روند ادامه می‌یابد. بدین ترتیب، نمونه‌های مرکب (خاک سست پیرامونی + ستون سنگی) ساخته می‌شوند. شابلون مورد استفاده برای نصب ستون‌های سنگی در جعبه برش مستقیم، در شکل (۲) نشان داده شده است. جهت نصب ستون‌های سنگی در جعبه دستگاه برش مستقیم، از الگوی مثلثی استفاده شده است. الگوی مثلثی، شامل ۷ ستون سنگی بوده که در دایره‌ای با قطر معادل $D_e = 1.05S$ که در آن، S فاصله مرکز به مرکز ستون‌های سنگی است، قرار داده می‌شوند. این دایره، شامل ستون‌های سنگی و خاک اطراف آن‌ها است. در این مطالعه شابلون در دو جهت رأس (Tip) و قاعده (Base) در دستگاه برش قرار داده شد تا تأثیر جهت چینش گروه ستون‌ها نیز مطالعه گردد.

نتایج و بحث و بررسی

نتایج کلی آزمایش

با استفاده از نتایج آزمایش‌های برش مستقیم شامل ترسیم نمودارهای تغییرات تنش برشی ـ جابه‌جایی افقی و نمودارهای تغییرات تنش برشی ـ تنش نرمال، پارامترهای معادل مقاومت برشی کل و در نهایت، مقادیر ظرفیت باربری پی متکی بر آن بستر، تعیین گردید. در جدول (۴) خلاصه نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان داده شده است. مقادیر ظرفیت باربری برای نمونه‌های مختلف، بر اساس نتایج حاصل از آزمایش برش مستقیم، مطابق فرمول هانسن (رابطه ۱) محاسبه شده است.

$$q_u = (0.5\gamma B N_\gamma S_\gamma) + (\overline{P}_0 N_q S_q) + (C N_C S_C) \quad (۱)$$

د رابطه فوق:

q: ظرفیت باربری نهایی خاک کف پی

چسبندگی خاک

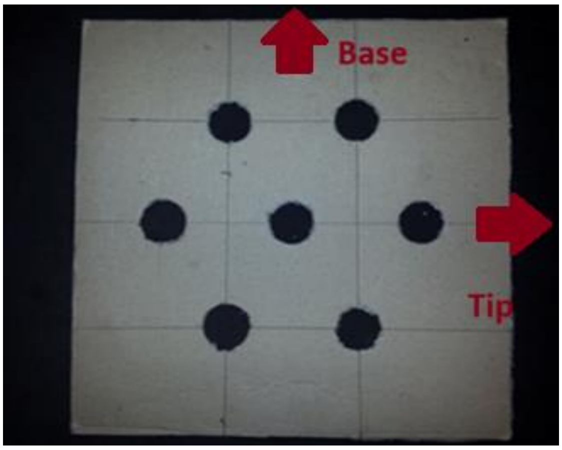
فشار سربار، برابر γD_f (γ، وزن مخصوص خاک اطراف پی)

I: عمق مدفون پی

B [illegible]

N_c، N_q، N_γ، S_c، S_q و S_γ، ضرایب ظرفیت باربری [30]

محا سبه ظرفیت بار ی از رابطه فوق، عمق مدفون پی(D_f) برابر یک و عرض پی (B) برابر ۵ متر فرض شده است.



شکل ۲ شابلون مورد استفاده برای نصب ستون سنگی در جعبه برش

جدول ۴ خلاصه نتایج آزمایش برش مستقیم برای خاک‌های پیرامونی شاهد و نمونه‌های مرکب

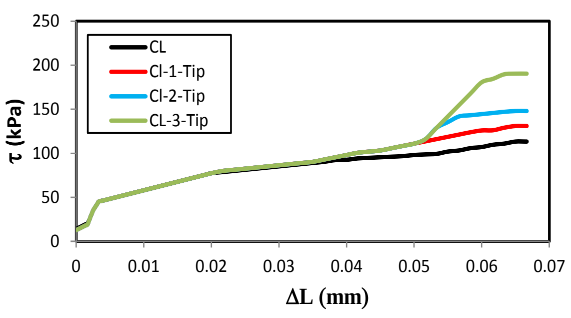
q_u (kPa)	ϕ (°)	C (kPa)	τ_{max} (kPa)	σ_v (kPa)	γ_{dmax} (kN/m^3)	ω_{opt} (%)	مشخصات نمونه
384	22	31	113.3	50 100 200	16.32	15.56	CL
602	26	34	131		16.32	15.56	CL-1L-Tip
882	29	38	148.1		16.32	15.56	CL-2L-Tip
2576	37	48	190.5		16.32	15.56	CL-3L-Tip
523	25	32	126.2		16.32	15.56	CL-1L-Base
679	27	35	135.2		16.32	15.56	CL-2L- Base
1591	34	40	173		16.32	15.56	CL-3L- Base
400	19	46	115.1		15.71	19.42	CH
544	22	49	128.5		15.71	19.42	CH-1L-Tip
759	25	53	145.2		15.71	19.42	CH -2L-Tip
1381	30	61	178.5		15.71	19.42	CH -3L-Tip
490	21	48	126.5		15.71	19.42	CH -1L-Base
661	24	50	139.1		15.71	19.42	CH -2L- Base
1071	28	57	164.1		15.71	19.42	CH -3L- Base

بررسی رفتار تنش برشی ـ جابه‌جایی

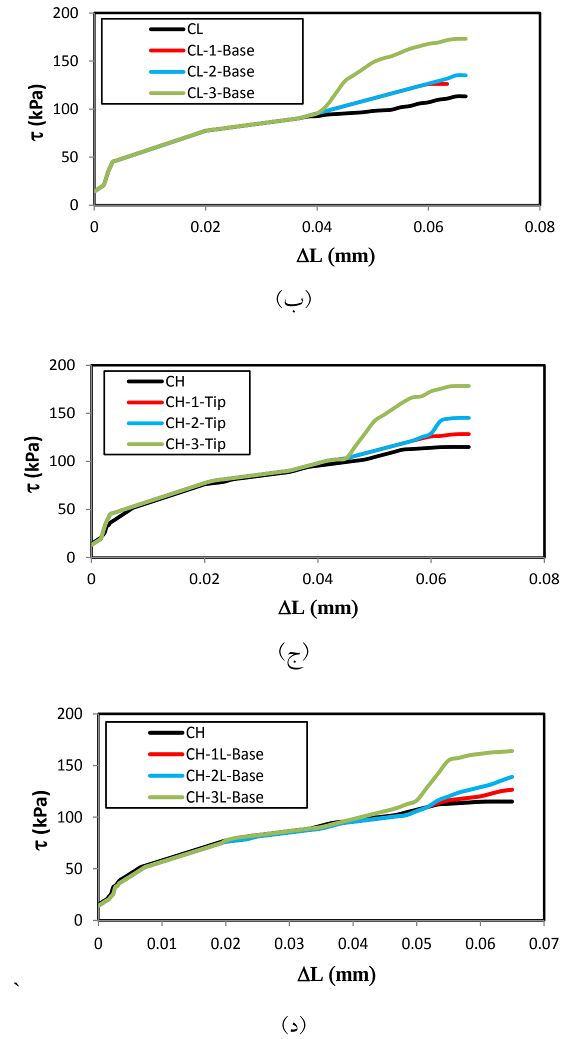
نتایج نشان می‌دهد افزایش تنش نرمال از ۵۰ به ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوپاسکال سبب افزایش تنش برشی می‌گردد که قابل انتظار است. به عنوان نمونه نمودارهای تنش برشی ـ جابه‌جایی افقی، برای نمونه‌های حاوی خاک‌های CL و CH مسلح شده با ستون سنگی و غیرمسلح در دو حالت بارگذاری در راستای چینش از رأس و قاعده، با تنش نرمال ۲۰۰ کیلوپاسکال در شکل (۳) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۳) مشاهده می‌گردد، صرف نظر از مقدار تنش نرمال اعمال شده و تعداد لایه‌های ساخت ستون سنگی و محل بارگذاری آن‌ها در چیدمان مثلثی، بهسازی خاک پیرامونی رسی با ستون سنگی، موجب افزایش تنش برشی گسیختگی و در نتیجه، افزایش مقاومت نمونه بهسازی شده با ستون سنگی، در مقایسه با خاک بهسازی نشده می‌گردد.

نتایج نشان می‌دهد در خاک CL و CH، صرف نظر از مقدار تنش نرمال، با افزایش تعداد لایه‌های آماده‌سازی ستون سنگی، مقاومت برشی افزایش یافته است. این موضوع به سبب افزایش یکنواختی تراکم و بهبود عملکرد ستون سنگی می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد، خاک پیرامونی CL با توجه به سختی بیشتر نسبت به خاک CH محصورشدگی بیشتری در ستون سنگی ایجاد می‌کند لذا دانه‌های ماسه در کرنش برشی کوچک‌تری بسیج شده و با ایجاد قفل و بست مقاومت برشی کل را افزایش می‌دهد. علاوه بر این نتایج نشان می‌دهد با افزایش تعداد لایه‌های آماده‌سازی ستون سنگی و در نتیجه افزایش تراکم و یکنواختی خاک ماسه ای در هر ستون، جابه‌جایی نسبی کمتری جهت بسیج دانه‌های خاک و افزایش مقاومت برشی مجموعه مورد نیاز است.

با توجه به شکل (۳)، جهت چیدمان گروه ستون سنگی تأثیر قابل توجهی بر کارایی این روش به‌سازی دارد. در صورت چیدمان و بارگذاری در راستای چینش از رأس، مقدار مقاومت برشی گروه ستون سنگی بیشتر از شرایطی است که چیدمان و بارگذاری در راستای چینش از رأس انجام می‌گیرد، که بیانگر توزیع مناسب‌تر تنش در ستون‌های سنگی در صورت بارگذاریی در جهت قاعده است.



(الف)



شکل ۳ تغییرات تنش برشی ـ جابه‌جایی افقی تحت تنش نرمال ۲۰۰ کیلوپاسکال برای نمونه‌ها: الف) غیر مسلح و مسلح شده خاک CL با گروه ستون سنگی آماده شده در ۱ تا ۳ لایه و بارگذاری در راستای چینش از رأس، ب) قاعده، ج) غیر مسلح و مسلح شده خاک CH با گروه ستون سنگی آماده شده در ۱ تا ۳ لایه و بارگذاری در راستای چینش از راس و د) قاعده

بررسی خصوصیات مقاومت برشی معادل

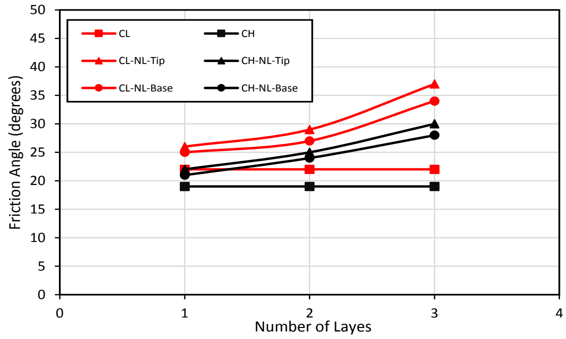
مقادیر پارامترهای مقاومت برشی معادل به دست آمده از آزمایش برش مستقیم، برای خاک‌های پیرامونی CL و CH و نمونه‌های مرکب متشکل از خاک‌های مذکور و ستون‌های سنگی، همچنین، میزان تغییرات این پارامترها در نمونه‌های مرکب، نسبت به مقدار مربوطه در خاک پیرامونی، در جدول (۳) ارائه گردیده است. این مقادیر بیانگر عملکرد کلی توده خاک مسلح شده است و می‌تواند معیاری برای برآورد ظرفیت باربری پی متکی بر این خاک ارائه کند. در نهایت بر اساس مقادیر معادل به دست آمده ظرفیت باربری معادل پی متکی بر بستر محاسبه شده و به منظور ارزیابی عملکرد روش به‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در شکل (۴) تغییرات چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی معادل بستر مسلح نشده و مسلح شده با گروه ستون سنگی و بارگذاری در راستای چینش از رأس و قاعده بر حسب تعداد لایه‌های آماده سازی ستون‌های سنگی، نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد، بازای تعداد لایه ثابت ساخت ستون سنگی و بارگذاری در راستای چینش یکسان (راستای رأس و قاعده)، در هر دو دسته نمونه‌های مسلح شده شامل خاک پیرامونی CL و CH، مقدار چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی معادل نسبت به مقادیر آن در نمونه‌های مسلح نشده افزایش یافته است. این افزایش با بیشتر شدن تعداد لایه‌های آماده‌سازی ستون‌های سنگی بیشتر می‌شود. علاوه بر این نتایج نشان می‌دهد در حالت بارگذاری در راستای چینش از رأس، مقدار چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی معادل بزرگ‌تری نسبت به حالت بارگذاری در راستای چینش از قاعده به ازای هر تعداد لایه‌های آماده‌سازی و یا هر نوع خاک پیرامونی، که در این مطالعه بررسی شده است، حاصل می‌گردد.

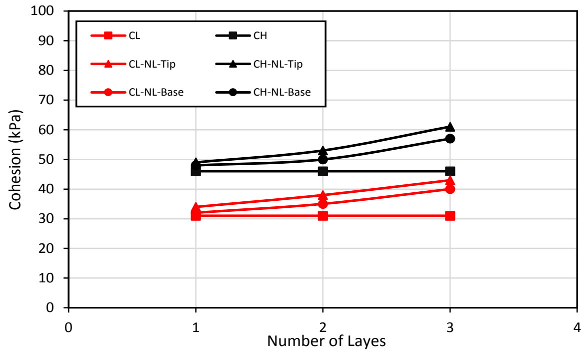
علاوه بر این نتایج نشان می‌دهد، با به‌سازی خاک با استفاده از گروه ستون سنگی، میزان افزایش چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی معادل در نمونه‌های با خاک پیرامونی CL بیشتر از نمونه‌های با خاک پیرامونی CH بوده است. بیشترین میزان افزایش زاویه اصطکاک داخلی معادل نمونه‌های به‌سازی شده حاوی خاک‌های پیرامونی CL و CH، نسبت به مقدار متناظر آن در نمونه‌های به‌سازی نشده، به ترتیب، ۶۸,۲ درصد و ۵۷,۹ درصد و بیشترین میزان افزایش چسبندگی داخلی معادل نمونه‌های به‌سازی شده حاوی خاک‌های پیرامونی CL و CH، نسبت به مقدار متناظر آن در نمونه‌های به‌سازی نشده، به ترتیب، ۳۸,۷۱ درصد و ۳۲,۶۱ درصد بوده است. این موضوع بیانگر کارایی بیشتر ستون سنگی در خاک‌هایی با سختی بستر می‌باشد که می‌توانند محصورشدگی بیشتری را برای هر ستون تأمین کنند.

به طور کلی، تکنیک به‌سازی خاک به واسطه ستون سنگی، شامل حذف بخشی از خاک سست پیرامونی و جایگزین نمودن آن با ستون‌های ماسه‌ای متراکم می‌باشد. در این مطالعه، ستون‌های ساخته شده به طور کامل در لایه خاک سست نفوذ کرده‌اند و بر کف سخت جعبه دستگاه آزمایش برش متکی شده است. وجود

این ستون‌های سخت، منجر به ایجاد توده خاک ترکیبی، شامل خاک سست و جسم سخت ستون می‌شود که در مقایسه با خاک سست به‌سازی نشده، دارای سختی، تراکم و مقاومت برشی بالایی می‌باشد. افزایش چسبندگی معادل نمونه‌های مرکب نسبت به خاک پیرامونی را می‌توان به تراکم، انسجام و مقاومت برشی بالای توده ترکیبی تشکیل شده نسبت داد. یکی از دلایل افزایش مقاومت برشی در چیدمان مثلثی، افزایش فشار محصورکنندگی اعمال شده توسط ستون‌های سنگی به خاک بین این ستون‌ها است. در مطالعات گذشته نیز نتایج مشابهی مشاهده شده است [13].



(الف)



(ب)

شکل ۴ تغییرات الف) زاویه اصطکاک داخلی و ب) چسبندگی معادل بستر مسلح نشده و مسلح شده با گروه ستون سنگی و بارگذاری در راستای چینش از رأس و قاعده بر حسب تعداد لایه‌های آماده‌سازی ستون‌های سنگی

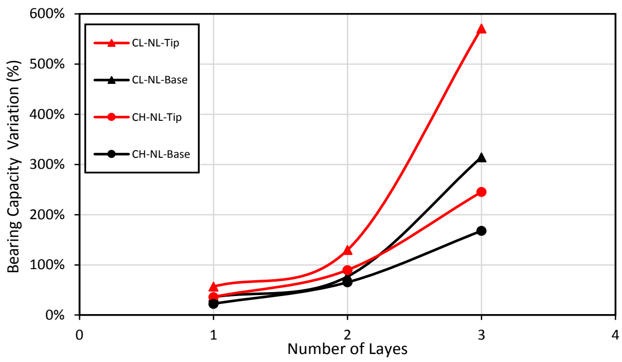
بررسی ظرفیت باربری پی متکی بر بستر

در شکل (۵) تغییرات ظرفیت‌های باربری محاسبه شده بر اساس مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی معادل به دست آمده از آزمایش برش مستقیم نمونه‌های مسلح نشده و مسلح شده با گروه ستون سنگی با بارگذاری در راستای چینش از رأس و قاعده بر حسب تعداد لایه‌های آماده‌سازی ستون‌ها نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد، صرف نظر از تعداد لایه‌های ساخت و بارگذاری در هر راستای چینش از ستون سنگی، به‌سازی خاک با گروه ستون سنگی، موجب افزایش ظرفیت باربری نسبت به خاک غیرمسلح شده است. از سوی دیگر، به ازای هر تعداد لایه ساخت ثابت و بارگذاری در هر راستای چینش از ستون‌ها، میزان افزایش ظرفیت باربری در تمام نمونه‌های مرکب با خاک پیرامونی CL در مقایسه با میزان افزایش ظرفیت باربری در تمام نمونه‌های مرکب با خاک پیرامونی CH بیشتر بوده است. بیشترین میزان افزایش ظرفیت باربری نمونه‌های مرکب متشکل از خاک‌های پیرامونی CL و CH و ستون‌های سنگی، نسبت به مقدار متناظر آن در خاک پیرامونی به ترتیب ۵۷۱ درصد و ۲۴۵ بوده است که بیانگر عملکرد بهتر خاک CL در تأمین محصورشدگی ستون‌های سنگی می‌باشد. علاوه بر این نتایج نشان می‌دهد که آماده‌سازی ستون‌های سنگی در تعداد لایه‌های بیشتر به سبب ایجاد یکنواختی در تراکم خاک هر ستون، موجب افزایش ظرفیت باربری معادل کل شده است. به طور کلی، افزایش ظرفیت باربری در به‌سازی خاک سست با ستون سنگی، ناشی از عوامل زیر است:

۱. ویژگی‌های اصطکاکی مصالح ستون سنگی
۲. چسبندگی و ویژگی‌های اصطکاکی بین خاک پیرامونی و ستون سنگی
۳. فشردگی و چگالش خاک سست پیرامونی، در اثر نصب ستون سنگی
۴. تغییر خصوصیات خاک پیرامونی و تنش‌های موجود در توده خاک، به واسطه قرارگیری مصالح سخت‌تر ستون سنگی در خاک رس پیرامونی
۵. نوع عملکرد ستون سنگی

بر اساس مطالعات گذشته، مقاومت خاک به‌سازی شده با استفاده از ستون‌های سنگی، از اندرکنش بین خاک و ستون تأمین می‌شود که این اندرکنش، از فشار جانبی ایجاد شده در توده خاک اطراف نشئت گرفته و بر قسمت‌های جانبی ستون سنگی اعمال می‌شود [31]. در این مطالعه، ظرفیت باربری نهایی در نمونه‌های مسلح شده با خاک پیرامونی CL، نسبت به ظرفیت باربری نهایی نمونه مسلح شده مشابه با خاک پیرامونی CH بیشتر بوده است.

دلیل این امر را می‌توان در عملکرد مصالح دانه‌ای ستون‌ها جستجو کرد. مقامت برشی مصالح دانه‌ای ستون سنگی تحت‌تأثیر فشار همه‌جانبه ایجاد شده در آن قرارداد با افزایش فشار همه‌جانبه و تنش نرمال در مصالح دانه‌ای قفل و بست دانه‌ها بیشتر شده و مقاومت برشی کل افزایش می‌یابد. در صورتی که خاک پیرامونی تراکم بیشتری داشته باشد توانایی بیشتری در محصور کردن دانه‌ها دارد و در نتیجه می‌تواند فشار همه‌جانبه بیشتری در مصالح دانه‌ای به ازای هر مقدار تنش سربار یکسان (در این مطالعه تنش نرمال آزمایش برش مستقیم) ایجاد کند.



شکل ۵ تغییرات ظرفیت‌های باربری محاسبه شده بر اساس مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی معادل به دست آمده از آزمایش برش مستقیم نمونه‌های مسلح نشده و مسلح شده با گروه ستون سنگی و بارگذاری در راستای چینش از رأس و قاعده بر حسب تعداد لایه‌های آماده‌سازی ستون‌های سنگی

علاوه بر این لازم به ذکر است که بر اساس مطالعات قبلی انجام شده [8]، در ساخت ستون سنگی، به طور معمول، ۱۵ تا ۳۵ درصد از حجم خاک ضعیف با مصالح ستون سنگی جایگزین می‌شود. لذا، با رعایت محدوده درصد بهینه اشغال حجم ستون-های سنگی در خاک‌های نرم رسی، ستون‌های سنگی موجب بهبود ظرفیت باربری خاک نرم می‌شوند که در مورد ستون‌های سنگی نصب شده در خاک سست پیرامونی در این تحقیق، درصد اشغال حجم ستون‌های سنگی در جعبه برش، معادل ۲۹/۹۲ درصد بوده که در محدوده درصد بهینه اشغال مذکور قرار دارد.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه تأثیر به‌سازی دو نوع خاک رسی با استفاده از گروه ستون سنگی بررسی گردید. به این منظور از دستگاه برش مستقیم بزرگ‌مقیاس استفاده شد. به طور کلی تأثیر عواملی مانند نوع خاک پیرامونی ستون سنگی، تعداد لایه‌های خاک جهت آماده‌سازی ستون‌ها و راستای بارگذاری نسبت به جهت چینش گروه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از روش به‌سازی گروه ستون سنگی می‌تواند باربری خاک‌های رسی را به طور قابل توجهی افزایش دهد. کارایی این روش در خاک‌های CL بیشتر از خاک‌های CH است. این موضوع می‌تواند ناشی از سختی بیشتر خاک CL و در نتیجه ایجاد محصورکنندگی بیشتر برای ستون شنی باشد که به کمک غلاف محصور نشده است. علاوه بر این نتایج نشان داده نحوه اجرای ستون سنگی و یکنواختی تراکم ماسه درون آن می‌تواند تأثیر معنی‌داری بر کارایی این روش به‌سازی داشته باشد. در فرایند اجرای ستون سنگی هر چقدر تعداد لایه‌هایی که طی آن مصالح درون ستون ریخته و متراکم می‌گردد بیشتر باشد تراکم یکنواخت‌تری در مصالح ستون ایجاد می‌گردد و در نتیجه قفل و بست دانه‌های خاک درون ستون با یکدیگر بیشتر شده و مقاومت برشی مصالح افزایش می‌یابد. همچنین نتایج آزمایش نشان داد، حداقل جابه‌جایی مورد نیاز جهت بسیج نیروی پیسیو جهت کارایی به‌سازی به روش ستون سنگی موردنیاز است، در خاک CL کمتر از خاک CH می‌باشد. همچنین این مقدار با افزایش تعداد لایه‌های اجرایی ستون سنگی و یکنواخت‌تر شدن تراکم درون ستون‌ها کاهش می‌یابد. این موضوع بیانگر اهمیت تراکم و فشار محصورشدگی در مصالح ستون سنگی می‌باشد که پیشتر به آن اشاره گردید. با افزایش تراکم و محصورشدگی مصالح دانه‌ای درون ستون‌ها، جابه‌جایی کمتری جهت قفل و بست دانه‌های مصالح و ایجاد نیروی مقاوم مورد نیاز است. علاوه بر این مطالعه حاضر نشان داد در اجرای محدود گروه ستون سنگی با آرایش مثلثی، راستای قرارگیری الگوی ستون‌ها نسبت به جهت بار می‌تواند بر ظرفیت باربری نهایی اثرگذار باشد. هر چند در صورت افزایش تعداد ستون‌های سنگی و گسترده‌تر شدن پلان به نحوی که راستای قاعده از رأس قابل تفکیک نباشد، جهت بارگذاری نسبت به راستای چینش تأثیر محسوسی نخواهد داشت.

در این تحقیق از سه نوع خاک مشخص، یک ابعاد مشخص ستون، یک ابعاد مشخص جعبه آزمایش و دستگاه آزمایش برش مستقیم استفاده شده است. نتایج به دست آمده محدود به مصالح روش آزمایش و ابعاد هندسی مورد بررسی است. نتایج به دست

آمده در این مطالعه صرفا در خصوص مقاومت برشی معتبر بوده و ممکن ا ست قابل تعمیم به ن شست و تحکیم خاک به سازی شـده نباشـد. همچنین نتایج این مطالعه تفاوت راسـتای سـطح گ سیختگی ن سبت به امتداد ستون‌های شنی در برش م ستقیم ن سبت به شرایط واقعی در زیر پی را در نظر نمی‌گیرد و مطالعه عملکرد روش به‌سـازی را از نظر تغییر شـکل و تحکیم ارزیابی نمی‌کند. لکن نتایج این تحقیق می‌تواند مورد توجه محققان در زمینه‌های مطالعاتی مشابه با شرایط محیطی متفاوت مانند دانسته درصد رطوبت جنس مصالح و ابعاد مختلف قرارگیرد و به درک گسـترده‌تر و عمیق‌تری از موضـوع به‌سـازی خاک به روش ستون‌های سنگی و ماسه‌ای منتج گردد.

واژه نامه

دستگاه برش مستقیم بزرگ‌مقیاس	Large-scale direct shear apparatus
روش سریع	Fast method
خاک‌های CL و CH	CL and CH soils
خاک ماسه‌ای از طبقه SM	SM soil
روش UU	UU test method
سیستم طبقه‌بندی متحد	Unified Soil Classification System
LL حد روانی	Liquid Limit (LL)
PL حد خمیری	Plastic Limit (PL)
PI شاخص خمیری	Plasticity Index (PI)
ω درصد رطوبت نمونه سازی	Moisture content (ω)
Gs چگالی ویژه	Specific gravity (Gs)
γdmax وزن مخصوص خشک حداکثر	Maximum dry unit weight (γdmax)
ωopt درصد رطوبت بهینه	Optimum moisture content (ωopt)
تنش نرمال	Normal stress
تنش برشی	Shear stress
چسبندگی	Cohesion
زاویه اصطکاک داخلی	Internal friction angle
ظرفیت باربری نهایی	Ultimate bearing capacity (qu)
ضرایب ظرفیت باربری	Bearing capacity factors

سپاسگزاری

مراجع

[1] Management and Planning Organization of Iran, Guidelines for the Stabilization of Embankment and Pavement Layers (Publication No. 268), Tehran, Iran, 2003.

[2] S. Tabarsaz and A. Soroush, "Numerical Analysis of Ground Reinforced with a Stone Column Group," *Modares Civil Engineering Journal (MCEJ)* , vol. 10, no. 2, pp. 27–37, 2010.

[3] M. R. Malekpoor and Gh. R. Poorebrahimi, "Experimental and Numerical Modeling of Soft Soil Improvement using Compacted Lime Mortar Columns," *Modares Civil Engineering Journal (MCEJ)* , vol. 14, no. 2, pp. 129–141, 2014.

[4] S. Ghafarpour Jahromi, S. Ghorban Beigi, and M. Yaghoubi, "Investigation of Failure Mechanism in Ground Improved with Group of Stone Columns," in *Proceedings 1st National Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* , Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran, 2014. https://civilica.com/doc/332722

[5] M. Mokhtari and B. Kalantari, "Soft Soil Stabilization Using Stone Columns—A Review," *Electronic Journal of Geotechnical Engineering (EJGE)*, vol. 17, no. J, pp. 1459–1466, 2012.

[6] S. Ghaffarpour Jahromi, S. Gharbanbeygi, and M. Yaghoubi, "Evaluation of Distinct Factor Affecting the Bearing

Capacity in Ground Improvement with Stone Column Group," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 32, no. 1, pp. 137–150, 2019. https://doi.org/10.22067/civil.v32i1.61713

[7] R. Aza-Gnandji and D. Kalumba, "Experimental and Numerical Analyses of the Behavior of Rammed Stone Columns Installed in a South African Soft Soil," *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology*, vol. 3, no. 6, pp. 477–499, 2014.

[8] A. Fouladi, The Effect of Stone Columns on Bearing Capacity of Soil , M.Sc. thesis, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran, 2013.

[9] M. Mokhtari, Numerical Analysis of the Effect of Stone Column Groups on Bearing Capacity of Clay Soils in Hormozgan Province , M.Sc. thesis, University of Hormozgan, Iran, 2014.

[10] D. Moradi Kholaki, Determining the Effect of Diameter and Arrangement of Stone Columns on Mechanical Parameters of Clay Reinforced with Stone Column Groups , M.Sc. thesis, Islamic Azad University, Central Tehran Branch, 2016.

[11] H. Kardgar, "Investigation of the Bearing Capacity of Foundations on Encased Stone Columns Using Finite Element Method," *International Journal of Integrated Engineering*, vol. 10, no. 1, 2018.

[12] A. Hanna, M. Khalifa, and M. A. Rahman, “Experimental investigation on stone columns in cohesive soil,” in Proceeding International Congress and Exhibition: Sustainable Civil Infrastructures – Innovative Infrastructure Geotechnology, Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2018, pp. 171–181.

[13] M. Aslani, J. Nazariafshar, and N. Ganjian, "Experimental Investigation of Equivalent Shear Strength of Loose Sand Reinforced with Stone Column," *Journal of Engineering Geology*, vol. 13, no. 3, pp. 1–5, 2019. http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.jeg.13.3.365

[14] A. Hamzh, H. Mohamad, and M. F. Bin Yusof, "The Effect of Stone Column Geometry on Soft Soil Bearing Capacity," *International Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 16, no. 2, pp. 200–210, 2019. https://doi.org/10.1080/19386362.2019.1666557

[15] M. J. M. Al-Waily, M. Y. Fattah, and M. S. Al-Qaisi, “Experimental and statistical study on single and groups of stone columns,” *Key Engineering Materials*, vol. 857, pp. 399–408, 2020. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.857.399

[16] N. Hataf, N. Nabipour, and A. Sadr, "Experimental and Numerical Study on the Bearing Capacity of Encased Stone Columns," *International Journal of Geo-Engineering*, vol. 11, no. 1, 2020. https://doi.org/10.1186/s40703-020-00111-6

[17] J. Nazariafshar, M. Aslani, and N. Mehrannia, "Experimental Study on Equivalent Shear Strength of Cohesive Soils Improved with Stone Columns by Triaxial Testing," *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, vol. 52, no. 9, pp. 2191–2210, 2020.

[18] A. Haddad and M. Shahverdi, “Experimental study of the performance of floating stone columns filled with recycled materials,” *Sharif Journal of Civil Engineering*, vol. 36.2, no. 3.1, pp. 131–139, 2020.

[19] F. Xu, H. Moayedi, L. K. Foong, M. Jamali Moghadam, and M. Zangeneh, "Laboratory and Numerical Analysis of Geogrid Encased Stone Columns," *Measurement*, vol. 169, 2021. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108369

[20] S. Saxena and L. B. Roy, "The Effect of Geometric Parameters on the Strength of Stone Columns," *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 12, no. 4, pp. 9028–9033, 2022. https://doi.org/10.48084/etasr.5138

[21] M. Kazemzadeh, A. Zad, and M. Yazdi, "Numerical Modeling of Improvement of Soft Soil with Stone Columns under High-Speed Train Crossing," *Civil Infrastructure Researches*, vol. 7, no. 2, pp. 157–168, 2022. https://doi.org/10.22091/cer.2021.7397.1304

[22] N. Bazazzadegan, N. Ganjian, and J. Nazariafshar, "Effect of Soft Lens on the Behavior of Ordinary and Reinforced Stone Columns Located in Saturated Sandy Bed," *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, vol. 55, no. 2, pp. 11–11, 2023. https://doi.org/10.22060/ceej.2023.21390.7711

[23] S. Amirafshari and A. Ghanbari, "A Geotechnical Centrifuge Study on the Bearing Capacity of Ring Foundations Reinforced by Stone Columns," *International Journal of Geomechanics*, vol. 25, no. 1, p.04024321, 2025. https://doi.org/10.1061/IJGNAI.GMENG-9948

[24] G. Fan, M. Nasiri, and E. Amiri, "Stabilized Slope Using Stone Columns Reinforced with Geotextile Encasement and Laminated Coatings: A Case Study," *Natural Hazards Review*, vol. 26, no. 2, 2025. https://doi.org/10.1061/NHREFO.NHENG-2143

[25] ASTM-D3080, Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils under Consolidated Drained Conditions, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004.

[26] ASTM-D422, Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007.

[27] ASTM-D4318, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.

[28] ASTM-D2216, Standard Test Method for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.

[29] ASTM-D854, Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.

[30] ASTM-D698, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.

[31] ASTM-D2487, Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.

[32] Ministry of Roads and Urban Development, National Building Code of Iran, Part 7: Foundation, Iran Development Publisher, Tehran, 2013.

[33] S. F. Kwa, E. S. Kolosov, and M. Y. Fattah, "Ground Improvement Using Stone Column Construction Encased with Geogrid," *Construction of Unique Buildings and Structures*, no. 3(66), pp. 49–59, 2018. https://doi.org/10.18720/CUBS.66.5

[34] A. Shakibi Nezhad, S. Gholipour, and M. Makarchian, "Investigation of Shear Behavior of Stone Columns in Sandy Bed," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 38, no. 1, 2024. https://doi.org/10.22067/jfcei.2024.90055.1323

[35] M. Hajiazizi and M. Nasiri, "Experimental and Numerical Investigation on Stability of Reinforced Sandy Slope Using Reinforced Stone Column with Horizontally Laminated Geotextile Disks," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 32, no. 1, pp. 55–72, 2019. https://doi.org/10.22067/civil.v32i1.62412

[36] N. Pishvaei, M. Jiryaei Sharahi, and M. Amelsakhi, "Laboratory Investigation on Stabilization of Clay with Calcium Lignosulfonate and Polyethylene Fibers under Wetting and Drying Cycles," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 36, no. 1, pp. 85–96, 2023. https://doi.org/10.22067/jfcei.2023.74674.1112

[37] A. Negahdar, S. Yadegari, and S. Houshmandi, "Investigation of Creep Behavior of the Clay Soil in the Laboratory Condition," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 28, no. 1, pp. 1–12, 2016. https://doi.org/10.22067/civil.v28i1.34947

[38] K. Mehrshahi and H. Alielahi, "Estimating the Geotechnical Design Parameters of Improved Soil by Preloading Method Using Instrumentation Results and Numerical Approach – A Case Study," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 30, no. 1, pp. 13–30, 2018. https://doi.org/10.22067/civil.v1i30.52137

[39] N. Mehrannia, J. Nazariafshar, and F. Kalantary, "Experimental Investigation on the Effect of Geometry and Reinforced Floating Stone Columns on Bearing Capacity," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 31, no. 2, pp. 74–88, 2018. https://doi.org/10.22067/civil.v31i2.57449

[40] J. Bolouri-Bazaz, A. Mollahasani, and S. M. Hosseini, "A Comparative Study on Determination Soil Deformation Modulus Using In-Situ and Laboratory Plate Load Tests," *Ferdowsi Civil Engineering*, vol. 22, no. 1, pp. 45–62, 2011. https://doi.org/10.22067/civil.v22i1.9033